

На правах рукописи

Карсканов Иван Валерьевич



**Эффекты межэлектронного взаимодействия в  
квантовых гальваномангнитных явлениях в  
полупроводниковых гетероструктурах  $p$ - и  
 $n$ -типа**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург

2009

Работа выполнена в лаборатории полупроводников и полуметаллов Института физики металлов УрО РАН

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник  
Харус Герман Иосифович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Германенко Александр Викторович

доктор физико-математических наук,  
профессор Куркин Михаил Иванович

Ведущая организация: Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе  
РАН, г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «8» октября 2009 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького», по адресу: 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комн. 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан «7» сентября 2009 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000641721

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук,  
старший научный сотрудник

 Н.В. Кудреватых

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Большой интерес к электронным системам с пониженной размерностью связан со значительным развитием технологии их изготовления. В последнее время были разработаны методы промышленного производства полупроводниковых гетероструктур и сверхрешеток, а также систем квантовых проволок и точек. Благодаря этому появилось большое количество новых устройств, таких как полупроводниковые лазеры на сверхрешетках, светодиоды. Для получения устройств с необходимыми параметрами необходимо глубокое понимание физических процессов, происходящих в двумерных системах. Помимо широкого практического применения, двумерные системы интересны с точки зрения фундаментальной науки. В них были обнаружены квантовые эффекты на макроскопическом уровне, например, целочисленный и дробный квантовый эффект Холла (КЭХ), квантовые интерференционные эффекты в проводимости, квантовые фазовые переходы. И поэтому изучение двумерных электронных систем составляет фундаментальную задачу физики конденсированного состояния и отнесено к приоритетным направлениям физических исследований.

В последнее время, благодаря значительному прогрессу в технологии изготовления полупроводниковых гетероструктур, большое внимание уделяется исследованию систем, в которых важную роль играет межэлектронное взаимодействие. Одним из наиболее ярких эффектов, обусловленных сильным электрон-электронным взаимодействием и локализацией носителей заряда, является дробный квантовый эффект Холла. Данная диссертация посвящена проблеме, находящейся в центре теоретических и экспериментальных исследований последних лет, а именно, исследованию эффектов межэлектронного взаимодействия в двумерных системах делокализованных носителей (фермижидкостное взаимодействие).

**Целью** настоящей работы является систематическое исследование эффектов электрон-электронного ( $e$ - $e$ ) взаимодействия в гальваномагнитных явлениях в двумерных полупроводниковых гетероструктурах  $p$ - и  $n$ -типа, как в классически слабых магнитных полях (квантовые интерференционные эффекты),

так и в квантующих (режим квантового эффекта Холла).

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые проведен анализ особенностей квантовых интерференционных эффектов в двумерных системах с большим анизотропным  $g$ -фактором (системы  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ ). В таких системах необходимо учитывать сильное зеемановское расщепление уровней энергии электронов, приводящее к существенной зависимости интерференционного  $e$ - $e$  вклада от магнитного поля.
2. Исследование гетероструктур  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  в широком интервале температур позволило на одном и том же образце наблюдать интерференционный вклад в проводимость от межэлектронного взаимодействия в различных режимах: при низких температурах - в диффузионном режиме, при высоких температурах - в баллистическом режиме, а также в промежуточной области.
3. Сравнительный анализ температурных зависимостей ширины перехода плато-плато в режиме квантового эффекта Холла для двумерных гетероструктур  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  и  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  позволил выявить принципиальную разницу в экспериментальных проявлениях квантового фазового перехода в зависимости от характера примесного потенциала, а именно, от соотношения характерного масштаба потенциала  $d$  и магнитной длины  $\lambda$ : короткодействующий ( $d \ll \lambda$ ) или плавный ( $d \gg \lambda$ ) примесный потенциал.

**Практическая ценность** проведенных исследований состоит в том, что выявлена принципиальная недостаточность одноэлектронного подхода при интерпретации температурных и магнитополевых зависимостей продольного и холловского сопротивлений в двумерных полупроводниковых гетероструктурах. Обоснована необходимость учета межэлектронного взаимодействия как в области квантовых интерференционных эффектов в классически слабых магнитных полях, так и в области квантовых фазовых переходов плато-плато в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.



**На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:**

1. Установлено, что параболическое отрицательное магнитосопротивление, наблюдаемое во всех исследованных гетероструктурах в магнитных полях  $B \gg B_{tr}$  ( $B_{tr} = \hbar/4eD\tau$ ,  $D$  - коэффициент диффузии,  $\tau$  - время релаксации импульса) обусловлено квантовым интерференционным вкладом в проводимость от модифицированного беспорядком межэлектронного взаимодействия. Экстраполяция этого вклада из области сильных магнитных полей к  $B = 0$  дает возможность определить микроскопические характеристики двумерных систем: параметр ферми-жидкостного взаимодействия и время сбоя фазы волновой функции из-за неупругих столкновений электронов. В гетероструктурах  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  с аномально большим  $g$  - фактором ( $g \approx 20$ ) обнаружена существенная зависимость е-е вклада в проводимость от магнитного поля, обусловленная эффектом Зеемана.
2. В гетероструктурах  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  обнаружена немонотонная температурная зависимость сопротивления ( $d\rho/dT > 0$  при  $T \leq 1.5K$ ,  $d\rho/dT < 0$  при  $T > 1.5K$ ), вблизи перехода металл-диэлектрик ( $E_F\tau/\hbar \cong 1$ ). Показано, что она обусловлена перенормировкой параметра ферми-жидкостного взаимодействия при понижении температуры согласно представлениям теории ренорм-группы.  
  
Низкотемпературное положительное магнитосопротивление и, как следствие, установление в достаточно больших магнитных полях диэлектрического ( $d\rho/dT < 0$ ) поведения  $\rho(T)$  во всем исследованном интервале температур обусловлены подавлением большей части интерференционного е-е вклада в проводимость магнитным полем из-за сильного эффекта Зеемана в слоях  $p - Ge$ .
3. Обнаружено диэлектрическое ( $d\rho/dT < 0$ ) поведение сопротивления в гетероструктурах  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  в широком интервале температур ( $1.6 \leq T \leq 70 K$ ). Показано, что оно определяется квантовым интер-

ференционным вкладом за счет е-е взаимодействия как в диффузионном ( $k_B T \tau / \hbar \ll 1$ ), так и в баллистическом режимах ( $k_B T \tau / \hbar \gg 1$ ). Наблюдаемый с ростом температуры существенный сдвиг максимума холловской проводимости  $\sigma_{xy}(B)$  в сторону больших магнитных полей связан с температурной зависимостью времени релаксации  $\tau(T)$ , обусловленной е-е взаимодействием в баллистическом режиме.

4. Наблюдаемая в режиме квантового эффекта Холла степенная температурная зависимость ширины перехода плато-плато  $W \sim T^\kappa$  (с  $\kappa = 0.48$ ) для гетероструктур  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  соответствует результатам современной теории скейлинга для короткодействующего примесного потенциала. С другой стороны, линейная температурная зависимость  $W = \alpha T + \beta$ , обнаруженная в гетероструктурах  $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ , соответствует конечному уширению полосы делокализованных состояний даже при  $T = 0$  и может быть объяснена влиянием кулоновского взаимодействия электронов на экранирование флуктуаций плавного примесного потенциала.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на следующих конференциях: VIII Российская конференция по физике полупроводников (Екатеринбург, 2007), XVI и XVII Уральская международная зимняя школа по физике полупроводников (Екатеринбург, 2006 и 2008), 15 международный симпозиум "Nanostructures: Physics and Technology" (Новосибирск, 2007), 34 совещание по физике низких температур (НТ-34, Ростов на Дону, 2006), VI и VII Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества (Екатеринбург, 2005 и 2006).

**Публикации.** По результатам проведенных исследований опубликовано 5 статей в реферируемых российских и зарубежных журналах и 13 тезисов докладов, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, пять глав, основные выводы и два приложения. Объем диссертации составляет 92 страницы, включая 28 рисунков. Список литературы содержит 84 наименований.

## Содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований. Сформулирована цель и практическая значимость работы, а также приведены основные результаты работы.

**Первая глава** посвящена рассмотрению теории квантовых эффектов в проводимости двумерных систем в классически слабых и сильных магнитных полях.

В первой части рассмотрены основные результаты теории квантовых поправок [1]. Для начала приведены результаты классической теории проводимости, и указаны пределы её применимости. Далее описана квантовая интерференционная поправка к проводимости ( $\Delta\sigma^{WL}$ ) и температурная зависимость времени релаксации фазы, которая приводит к логарифмической зависимости  $\Delta\sigma^{WL}$  от температуры. В магнитных полях происходит подавление квантовой интерференционной поправки, это выражается в виде отрицательного магнитосопротивления. Учет межэлектронного взаимодействия приводит к дополнительному вкладу в проводимость. Затем приведены результаты теоретических расчетов для квантовой поправки к проводимости за счет электрон-электронного взаимодействия  $\Delta\sigma^{ee}$ . В сильных магнитных полях за счет эффекта Зеемана происходит подавление вклада триплетного канала в поправку от межэлектронного взаимодействия.

Вторая часть первой главы посвящена общим теоретическим представлениям о квантовом эффекте Холла [2].

**Вторая глава** посвящена описанию методики эксперимента. Первая часть этой главы посвящена описанию автоматизированной экспериментальной установки, приведена её блок-схема. Исследования гальваномагнитных явлений проводились на постоянном токе в интервале температур  $0.05 \div 70$  К в стационарных магнитных полях напряженностью до 12 Т. Для получения низких температур использовались три различные охлаждающие системы: рефрижератор растворения  $He^3$  в  $He^4$  для получения сверхнизких температур в интервале от 0.05 до 0.4 К, температурная вставка  $He^3$  для получения температур от 0.4 до 1.2 К и температурная вставка  $He^4$  для интервала

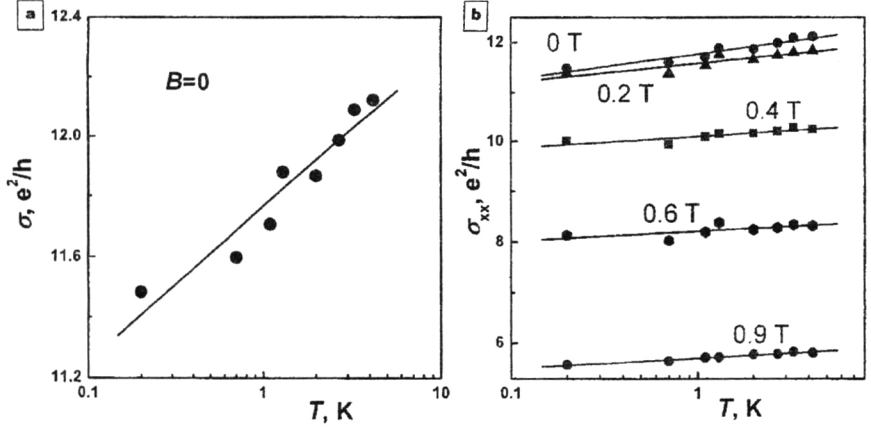


Рис. 1. Температурные зависимости проводимости  $\sigma_{xx}$  гетероструктуры  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  при  $B = 0$  [a] и при фиксированных значениях магнитных полей [b].

температур от 1.5 до 100 K.

Во второй части Главы 2 приводится информация об исследуемых образцах. В настоящей работе исследованы гетероструктуры с электронным двумерным газом в двойных квантовых ямах  $In_yGa_{1-y}As/GaAs$  и дырочным двумерным газом в многослойных гетероструктурах  $Ge/Ge_{1-x}Si_x$ .

**Третья глава** посвящена исследованию квантовых поправок к проводимости в гетероструктурах  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ .

Зависимость проводимости от температуры  $\sigma(T)$  подчиняется логарифмическому закону (см. рис. 1), как при  $B = 0$ , так и в фиксированных магнитных полях, что свидетельствует о присутствии вкладов квантовых поправок. В магнитных полях вплоть до  $\omega_c\tau = 1$  наблюдается отрицательное магнитосопротивление (рис. 2), которое, начиная с некоторого значения  $B$ , пропорционально  $B^2$  в соответствии с выражением [3]:

$$\rho_{xx}(B) = \frac{1}{\sigma_0} + \frac{[(\omega_c\tau)^2 - 1]\Delta\sigma^{ee}(B)}{\sigma_0^2}, \quad (1)$$

где  $\omega_c$  - циклотронная частота,  $\tau$  - время релаксации импульса. При  $\omega_c\tau = 1$  ясно видна точка, в которой сопротивление не зависит от температуры, и, как

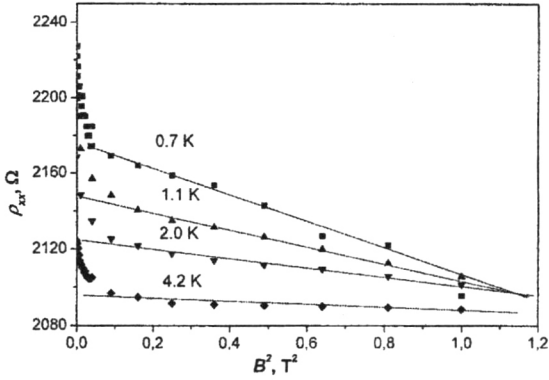


Рис. 2. Зависимость сопротивления  $\rho_{xx}$  гетероструктуры  $p\text{-Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  от квадрата магнитного поля  $B^2$  при фиксированных температурах  $T$ . Линиями показана экстраполяция к  $B = 0$ .  $B_0 \approx 1$  Тл.

следует из (1), равно обратной друдевской проводимости:  $\rho_{xx} = 1/\sigma_0$ . Значение магнитного поля, при котором имеет место температурно-независимая точка,  $B_0 = (1, 0 \pm 0, 1)$  Тл. Отсюда мы можем определить такие параметры образца, как классическая проводимость  $\sigma_0 = 12.3 e^2/h$ , подвижность носителей  $\mu = (1.0 \pm 0.1) \cdot 10^4 \text{ cm}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  и время свободного пробега  $\tau = (4.8 \pm 0.3) \cdot 10^{-13} \text{ с}$ .

Проводя аппроксимацию из области сильных магнитных полей, мы определили величину вклада электрон-электронного взаимодействия в проводимость с учетом эффекта Зеемана  $\Delta\sigma_{\infty}^{ee}$  (рис. 3а, кривая 2). Далее, по температурной зависимости полученных данных согласно выражению [1]:

$$\Delta\sigma_{\infty}^{ee}(T) = \frac{e^2}{\pi\hbar}(1 - \lambda) \ln \frac{kT\tau}{\hbar}, \quad (2)$$

где  $\lambda = \ln(1 + F_0^{\sigma})/F_0^{\sigma} - 1$  - амплитуда ферми-жидкостного взаимодействия,  $F_0^{\sigma}$  - константа взаимодействия, найдены значения параметра  $F_0^{\sigma} = -0,51 \pm 0.04$ .

Пределы сильных магнитных полей и нулевого магнитного поля связаны, причем эта связь определяется только константой электрон-электронного взаимодействия. Это позволило нам определить вклад электрон-электронного

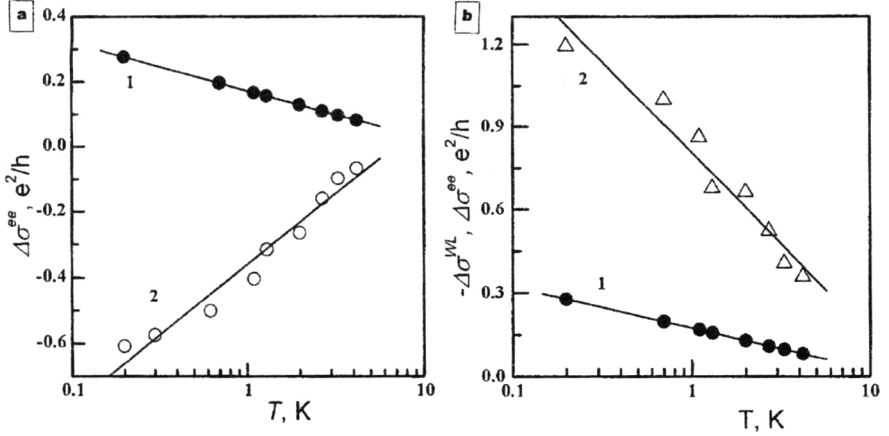


Рис. 3. Температурные зависимости вкладов электрон-электронного взаимодействия в проводимость гетероструктуры  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ : [a]  $\Delta\sigma_0^{ee}$  - вклад в нулевом магнитном поле (1) и  $\Delta\sigma_\infty^{ee}$  - вклад в сильных магнитных полях (2); [b] вклады в проводимость при  $B = 0$  от электрон-электронного взаимодействия  $\Delta\sigma_0^{ee}$  (1) и от слабой локализации  $\Delta\sigma^{WL}$  (2)

взаимодействия в проводимость при  $B = 0$ :

$$\sigma_0^{ee}(T) = \frac{e^2}{\pi h} (1 - 3\lambda) \ln \frac{kT\tau}{\hbar}. \quad (3)$$

На рис. 3а видно, что значения вклада  $\Delta\sigma_0^{ee}$  в нулевом магнитном поле (кривая 1 на рис. 3а) и полученные экстраполяцией к  $B = 0$  из области сильных магнитных полей,  $\Delta\sigma_\infty^{ee}$  (кривая 2 на рис. 3а) имеют разные знаки и разные знаки температурного коэффициента, т.е. вследствие зеемановского расщепления вклад электрон-электронного взаимодействия в магнитопроводимость меняет знак.

По формуле  $\sigma_{xx} = \sigma_0 + \Delta\sigma_0^{ee} + \Delta\sigma^{WL}$  находим значение  $\Delta\sigma^{WL}$  при  $B = 0$ . На рис. 3б представлены температурные зависимости полученных вкладов слабой локализации (кривая 2 на рис. 3б) и электрон-электронного взаимодействия (кривая 1 на рис. 3б) в нулевом магнитном поле. Видно, что  $|\Delta\sigma^{ee}| \simeq |\Delta\sigma^{WL}|/4$ .

При  $B = 0$  вклад в проводимость от квантовой интерференционной по-

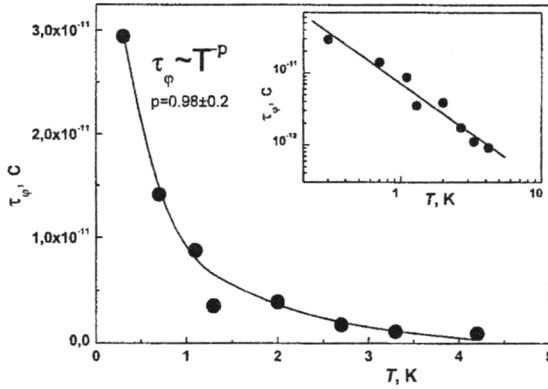


Рис. 4. Температурная зависимость времени сбоя фазы  $\tau_\varphi$ . На вставке тот же график в двойном логарифмическом масштабе.

правки выражается следующим образом:

$$\Delta\sigma^{WL} = \alpha \frac{e^2}{\pi h} \ln \frac{\tau_\varphi}{\tau}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  - префактор, число близкое к единице. Отсюда находим значения времени сбоя фазы  $\tau_\varphi$  электронной волны (см. рис. 4), для которого справедлива степенная температурная зависимость. Определенный здесь показатель степени  $p = -0.98$ , что близко к теоретическому значению  $p = 1$  для неупругой релаксации фазы за счет электрон-электронного взаимодействия (механизм Найквиста) в двумерных системах [1].

Во второй части третьей главы приводятся экспериментальные данные для ещё одной гетероструктуры на основе  $p\text{-Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ . Нами проводились измерения продольного и поперечного сопротивления в перпендикулярном магнитном поле  $B \leq 5$  Тл при температурах от 0.2 до 4.2 К. Для образца с концентрацией носителей  $1.2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  и подвижностью  $\mu_p = 4 \cdot 10^3 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$  (параметр  $E_F\tau/\hbar = 0.75$ ) наблюдается немонотонное низкотемпературное поведение сопротивления (рис. 5а): увеличение  $\rho(T)$  с понижением температуры от 4.2 до 1.5 К (локализация) и уменьшение  $\rho(T)$  при понижении  $T$  от 1.5 до 0.3 К (антилокализация). В области антилокализации при  $T \leq 1$  К проводимость логарифмически зависит от температуры (см. рис. 5а). Во

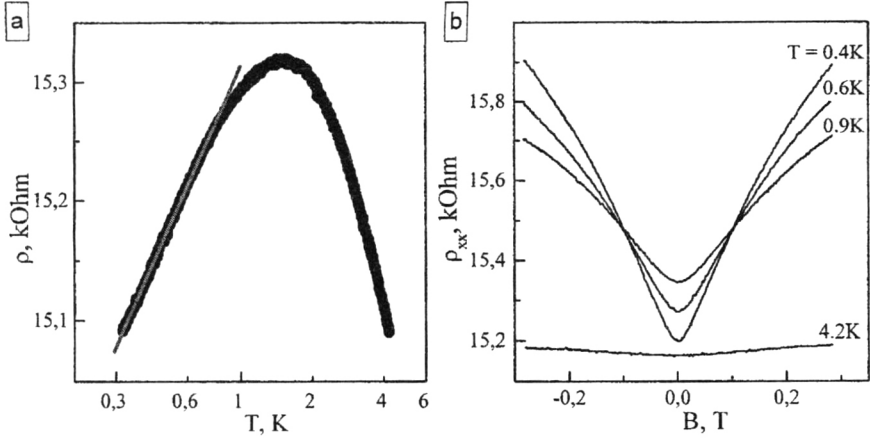


Рис. 5. [а] - температурная зависимость сопротивления без магнитного поля, по оси абсцисс логарифмический масштаб, [б] - зависимость сопротивления от перпендикулярного магнитного поля при различных температурах.

всем интервале температур наблюдается положительное магнитосопротивление, резко усиливающееся при понижении  $T$  (рис. 5б). При низких температурах  $T < 1$  К в полях  $B < 0.3$  Тл магнитосопротивление  $\Delta\rho_{xx}$  является почти универсальной функцией отношения  $B/T$  (рис. 6а).

Наблюдаемые зависимости сопротивления  $\rho(B, T)$  можно сопоставить с квантовыми поправками к двумерной проводимости за счет эффектов слабой локализации  $\Delta\sigma^{WL}$  и электрон-электронного взаимодействия  $\Delta\sigma^{ee}$ .

Проведено разделение квантовых интерференционных вкладов в проводимость от эффекта слабой локализации и от модифицированного беспорядком электрон-электронного (е-е) взаимодействия. При учете сильного зеемановского расщепления уровней энергии дырок выделены вклады синглетного ( $S = 0$ ) и триплетного ( $S = 1$ ) каналов в е-е квантовой поправке. Показано, что необычное поведение е-е квантовой поправки, соответствующее «анти-локализации», обусловлено преобладанием вклада триплетного канала из-за относительно большой величины параметра ферми - жидкостного взаимодействия  $|F_0^g| \approx 0.6 \pm 0.1$ .

Наблюдаемое немонотонное поведение  $\rho(T)$ , а именно, переход от диэлек-



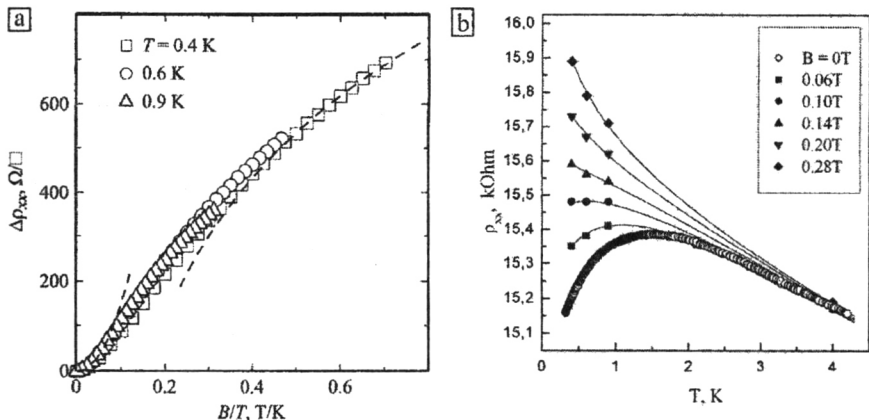


Рис. 6. [a] - магнитосопротивление как функция от  $B/T$ . Пунктирными линиями показаны подгонки при помощи теоретических выражений в пределах слабых и сильных магнитных полей, [b] - температурные зависимости сопротивления в фиксированных магнитных полях.

трического ( $d\rho/dT < 0$ ) к «металлическому» ( $d\rho/dT > 0$ ) поведению с понижением температуры, мы связываем с усилением роли триплетного канала в с-е квантовой поправке к проводимости. Увеличение вклада триплетного канала по мере понижения температуры обусловлено, по-видимому, предсказанной в теории Филькенштейна [4] перенормировкой параметра электрон-электронного взаимодействия, особенно существенной для 2D-систем в окрестности концентрационного перехода металл - диэлектрик ( $E_F\tau/\hbar \approx 1$ ). Зеемановское расщепление уровней энергии электрона в магнитном поле приводит к эффективному подавлению триплетного канала, что восстанавливает диэлектрическое поведение  $\rho(T)$  вплоть до самых низких температур (рис. 6b).

В Четвертой главе рассматриваются квантовые интерференционные эффекты в проводимости гетероструктур  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ .

На рис. 7а представлена температурная зависимость сопротивления в интервале от 2 К до 70 К при отсутствии магнитного поля. Температурная зависимость сопротивления  $\rho(T)$  имеет диэлектрический характер ( $d\rho/dT < 0$ ) во всем интервале  $T$ . Обычно в полупроводниках такое поведение  $\rho(T)$  обусловлено температурной зависимостью концентрации электронов  $n(T)$ . Но прове-

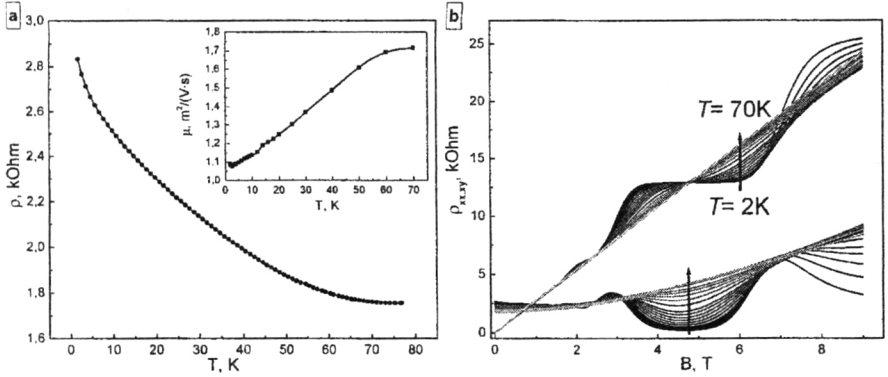


Рис. 7. [a] Зависимость сопротивления образца  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  от температуры. На вставке - температурная зависимость эффективной подвижности носителей заряда, определенной по положению максимума  $\sigma_{xy}(B)$  при разных  $T$ . [b] - Экспериментальные магнитопольевые зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xy}(B)$  при различных температурах.

денные нами измерения сопротивления в магнитном поле при фиксированных температурах показали, что  $\rho_{xy}(T)$  в слабых магнитных полях ( $\mu B \ll 1$ ) незначительно меняется с температурой (рис. 7b). Следовательно, коэффициент Холла ( $R_H(T) \sim 1/en(T)$ ) практически не меняется при изменении температуры, и объяснить наблюдаемую температурную зависимость  $\rho(T)$  за счет изменения концентрации электронов в системе нельзя. Мы полагаем, что необычное поведение  $\rho(T)$  (рост подвижности  $\mu(T)$  с ростом температуры) обусловлено вкладом в проводимость за счет межэлектронного взаимодействия в баллистическом режиме ( $kT\tau/\hbar > 1$ ) [5]:

$$\Delta\sigma_{ball}^{ee} = \frac{e^2}{\pi h} \left( 1 + \frac{3F_0^\sigma}{1 + F_0^\sigma} \right) \frac{kT\tau}{\hbar}. \quad (5)$$

Рассматриваемая система  $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  представляет собой двойную квантовую яму. В ней заполнены два уровня пространственного квантования: симметричный и антисимметричный. Если подвижности электронов, относящихся к разным подзонам пространственного квантования, различны, то магнитопольевые зависимости сопротивления и коэффициента Холла будут иметь вид, типичный для случая двух типов носителей заряда (рис. 8). Теоретические формулы для  $\rho_{xx}(B)$  и  $R_H(B)$  приведены в приложении Б. Нами была

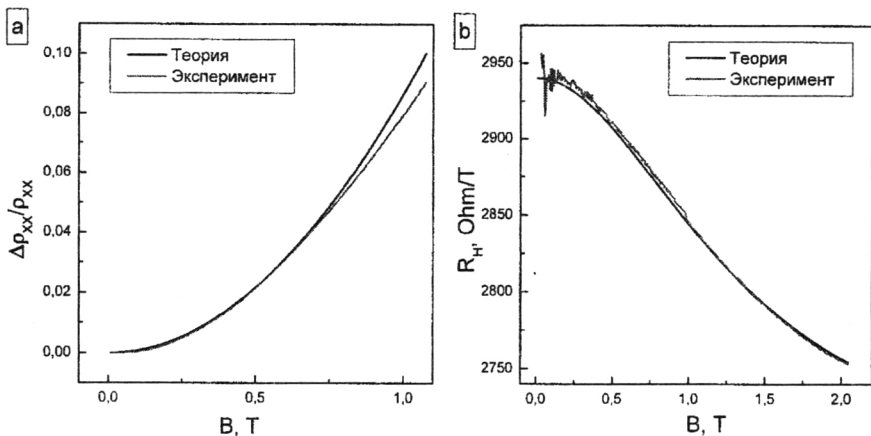


Рис. 8. Экспериментальные и теоретические зависимости, характерные для случая двух типов носителей заряда. Двойная квантовая яма  $In_yGa_{1-y}As/GaAs$ , температура 70 K: [a] - относительное изменение сопротивления в магнитном поле, [b] - зависимость коэффициента Холла от магнитного поля.

проведена обработка экспериментальных данных в интервале температур от 20 до 70 K для получения таких параметров как концентрация и подвижность для каждого типа носителей заряда. Для этого проводилась аппроксимация экспериментально полученных зависимостей  $(\rho_{xx}(B) - \rho_{xx}(0))/\rho_{xx}(0)$  и  $R_H(B)$  в слабых магнитных полях ( $\omega_c\tau < 1$ ). При более низких температурах значительно возрастал вклад в проводимость от слабой локализации, который также существенно влияет на магнитосопротивление. Кроме того, разность значений подвижности при понижении температуры уменьшается, что приводит к снижению точности расчетов. Поэтому при температурах ниже 20 K не удалось произвести разделение вкладов в проводимость от двух типов носителей заряда. Результаты расчетов представлены на рис. 9.

Видно, что концентрации электронов  $n_1$  и  $n_2$  практически не зависят от температуры. Естественнo предположить, что  $n_1$  - концентрация электронов в нижней (симметричной) подзоне, а  $n_2$  - в верхней (антисимметричной) подзоне в двойной квантовой яме. Экспериментально найденные значения  $n_1$  и  $n_2$  находятся в хорошем согласии со значениями, рассчитанными путем самосо-

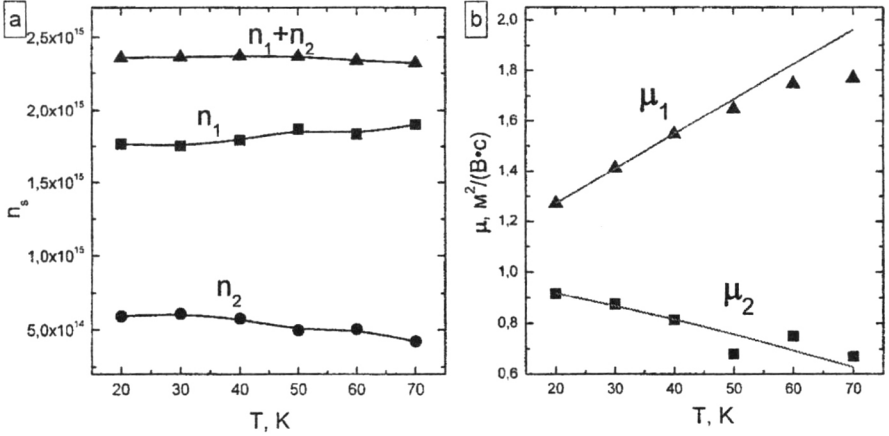


Рис. 9. [a] - Температурная зависимость концентрации носителей заряда в симметричной  $n_1$ , антисимметричной  $n_2$  подзонах пространственного квантования и их суммы. [b] - температурная зависимость подвижности носителей заряда в симметричной  $\mu_1$ , антисимметричной  $\mu_2$  подзонах пространственного квантования. Точками отмечены данные полученные из обработки эксперимента. Линиями построены теоретические зависимости.

гласованного решения уравнений Шредингера и Пуассона [6].

Интересные результаты получены для подвижностей  $\mu_1$  и  $\mu_2$  электронов в двух подзонах: для нижней подзоны (большая концентрация электронов)  $\mu_1(T)$  растет с ростом температуры  $T$ , а для верхней подзоны с меньшей концентрацией электронов  $\mu_2(T)$  убывает с ростом  $T$ . Этот результат находится в соответствии с нашими представлениями о том, что зависимости  $\mu_{1,2}(T)$  обусловлены вкладом в проводимость от межэлектронного взаимодействия в баллистическом режиме. Теоретическая обработка этих кривых дает значения  $F_0^\sigma = -0.14 \pm 0.2$  для нижней подзоны и  $F_0^\sigma = -0.27 \pm 0.2$  для верхней подзоны в соответствии с тем, что температурная добавка к проводимости  $\Delta\sigma_{ball}^{ee}$  меняет знак при  $F_0^\sigma \simeq -0.25$  (см. (5)).

**Пятая глава** посвящена особенностям квантового эффекта Холла (КЭХ) в гетероструктурах  $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  и  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$ . В начале главы рассматриваются основные положения теории двухпараметрического скейлинга и теоретические представления о температурной зависимости перехода

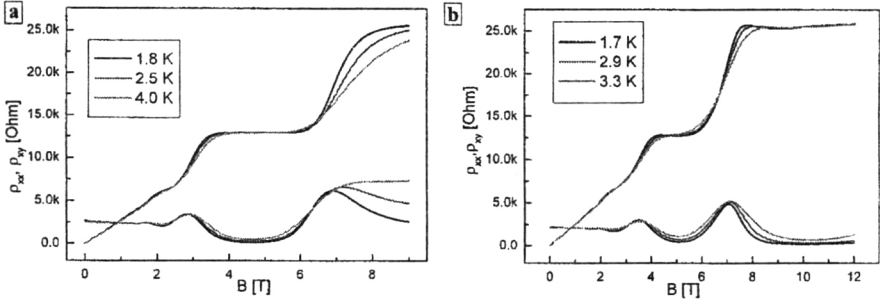


Рис. 10. [a] - Экспериментально полученные зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xy}(B)$  для образца  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  при температурах 1.8, 2.5 и 4.0 K, [b] - зависимости  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xy}(B)$  для образца  $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  при температурах 1.7, 2.9 и 3.3 K

плато-плато в режиме КЭХ.

Режим КЭХ можно рассматривать как последовательность квантовых фазовых переходов изолятор-металл-изолятор при сканировании уровнем Ферми плотности состояний неупорядоченной 2D-системы в квантующем магнитном поле. В рамках данной концепции переход между соседними плато КЭХ, так же как ширина пиков на зависимости  $\rho_{xx}(B)$ , должны становиться всё уже и уже при понижении температуры. В рамках теории скейлинга [7] ширина перехода между  $i$ -м и  $(i + 1)$ -м плато КЭХ должна стремиться к нулю по степенному закону:

$$\delta B_{i \rightarrow (i+1)} \sim T^\kappa, \quad (6)$$

здесь  $\kappa = 1/z\nu$ ,  $\nu = 7/3$  - критический индекс длины локализации,  $z = 1$  - динамический критический индекс.

Нами была проведена серия экспериментов на образцах  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  для получения зависимостей  $\rho_{xx}(B)$  и  $\rho_{xy}(B)$  при фиксированных температурах (от 0,8 до 6 K) и магнитных полях до 9 Тл. Основная часть рассеивающего потенциала для гетероструктур  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  имеет короткодействующий характер (рассеяние на сплавном потенциале в ямах  $\text{InGaAs}$ ). На рисунке 10а представлен пример полученных данных с использованием вставки  $\text{He}^4$ . Из полученных экспериментальных данных была вычислена зависимость  $\sigma_{xy}(B)$  и ширина перехода между первым и вторым плато КЭХ (ши-

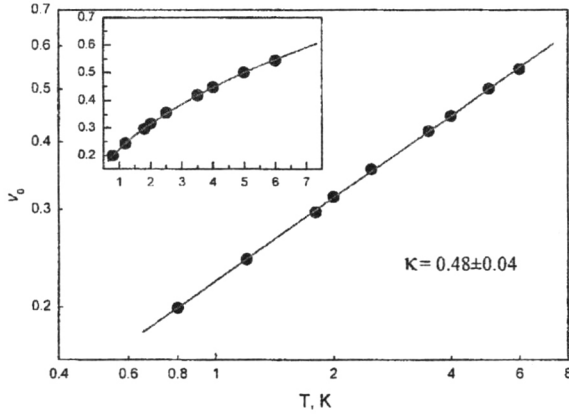


Рис. 11. Зависимость ширины полосы делокализованных состояний от температуры для образца  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  в двойном логарифмическом масштабе. На вставке та же самая зависимость в линейном масштабе.

рина полосы делокализованных состояний в спектре уровней Ландау  $\nu_0(T)$ ). Полученная температурная зависимость ширины полосы делокализованных состояний (рис. 11) хорошо описывается с помощью степенной зависимости  $\nu_0(T) \sim T^\kappa$  с показателем степени  $\kappa = 0.48 \pm 0.4$ , это значение близко к теоретическому значению 0,43 [7]. Отклонение от теоретического значения может быть обусловлено отличием характера рассеивающего потенциала от точечного.

На образцах  $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  была проведена аналогичная серия экспериментов (рис. 10b). Из расчетов были получены качественно отличающиеся результаты. На рисунке 12 представлена зависимость ширины полосы делокализованных состояний от температуры в двойном логарифмическом (на вставке) и линейном масштабе для гетероструктуры  $p\text{-Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ . В данном образце доминирующую роль играет крупномасштабный рассеивающий потенциал (рассеяние на удаленных ионизированных примесях в барьерах). Полученные экспериментальные данные хорошо описываются линейной зависимостью:

$$\nu_0(T) = \alpha T + \beta \quad (7)$$

с конечной шириной перехода даже при  $T \rightarrow 0$  ( $\beta = 0.076$ ).

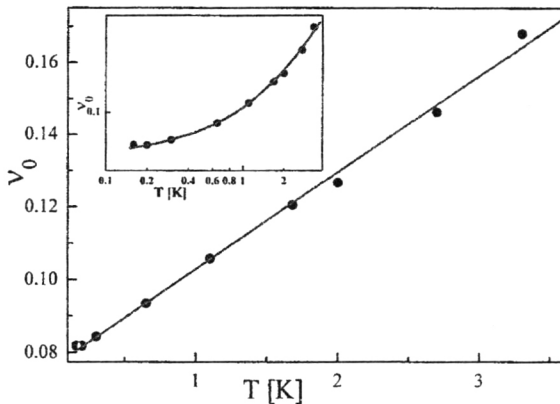


Рис. 12. Зависимость ширины полосы делокализованных состояний от температуры для образца  $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$ . На вставке та же самая зависимость, но в двойном логарифмическом масштабе

В работах [8,9] отмечена существенная роль *короткодействующего* случайного примесного потенциала для обнаружения скейлинговых зависимостей, тогда как крупномасштабный примесный потенциал значительно усложняет наблюдение критических квантовых явлений. В экспериментальной работе [9] при исследовании проводимости квантовых ям в гетероструктурах  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$  с контролируемым короткодействующим сплавным потенциалом наблюдается универсальная скейлинговая зависимость с параметром  $\kappa = 0.42 \pm 0.01$  для переходов плато-плато в области концентраций  $0.0065 < x < 0.016$ . При больших величинах  $x$  показатель степени увеличивается до  $\kappa \sim 0.58$ , это вызвано образованием кластеров атомов Al, изменением характера рассеивающего потенциала и, как следствие, отклонением от универсального скейлингового поведения.

Линейная по температуре зависимость ширины полосы делокализованных состояний  $\nu_0(T)$  является квазиклассической по природе и должна наблюдаться именно в образцах с медленно меняющимся потенциалом. С другой стороны, влияние кулоновского взаимодействия на экранирование плавного примесного потенциала [10] приводит к уширению делокализованного состояния в центре подзоны Ландау и к конечной ширине перехода плато-плато

квантового эффекта Холла при  $T \rightarrow 0$ .

В разделе **Основные результаты** обобщены выводы работы:

1. В двумерной дырочной системе  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  с большой величиной  $g$ -фактора и, следовательно, сильным эффектом Зеемана проведено разделение квантовых интерференционных вкладов в проводимость от эффекта слабой локализации и от модифицированного беспорядком межэлектронного взаимодействия.
2. Показано, что аномальное поведение вклада в проводимость от межэлектронного взаимодействия в гетеросистемах  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ , соответствующее «антилокализации», обусловлено преобладанием вклада триплетного канала из-за большой величины параметра ферми-жидкостного взаимодействия.
3. В двумерной дырочной системе с проводимостью  $\sigma \approx e^2/h$  обнаружена немонотонная температурная зависимость сопротивления (переход от локализации к «антилокализации» при понижении температуры) в качественном соответствии с предсказаниями современной теории ренорм-группы.
4. Показано, что положительное магнитосопротивление, наблюдаемое в гетероструктурах  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  с  $\sigma \approx e^2/h$ , обусловлено эффективным подавлением триплетного канала ферми-жидкостного взаимодействия вследствие сильного эффекта Зеемана.
5. В двумерной электронной системе  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  обнаружен существенный, линейный по температуре, рост подвижности носителей заряда, который связан с вкладом в проводимость от межэлектронного взаимодействия в баллистическом режиме.
6. В гетероструктурах  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  с двойными квантовыми ямами проведено разделение вкладов в проводимость от носителей тока двух заполненных подзон пространственного квантования: подзоны симмет-



ричных и антисимметричных состояний. Найдены параметры ферми-жидкостного взаимодействия для двух типов носителей заряда.

7. В режиме целочисленного квантового эффекта Холла в гетероструктурах  $n - \text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}/\text{GaAs}$  наблюдалось скейлинговое поведение ширины квантового фазового перехода плато-плато:  $\nu_0(T) \sim T^\kappa$  со значением критического индекса  $\kappa = 0.48 \pm 0.04$ , что близко к теоретическому значению.
8. В системах  $p - \text{Ge}/\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x$  с преимущественно плавным примесным потенциалом наблюдается квазиклассическое поведение ширины перехода плато - плато:  $\nu_0(T) = \alpha T + \beta$  с конечным уширением  $\beta$  даже при сверхнизких температурах. Теоретически такое поведение объясняется влиянием межэлектронного взаимодействия на экранирование флуктуаций плавного примесного потенциала.

**Приложение А** объясняет, почему в третьей главе мы не рассматриваем спин-орбитальное взаимодействие в качестве механизма, ответственного за антилокализационное поведение температурной зависимости сопротивления.

В **Приложении В** теоретически рассматривается зависимость сопротивления и коэффициента Холла от магнитного поля при наличии в проводимости вкладов от двух типов носителей заряда. Формулы, приведенные в данном приложении, использовались для анализа экспериментальных данных в четвертой главе.

## Публикации

В ведущих рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК:

- [A1] Y.G. Arapov, I.V. Karskanov, G.I. Harus, V.N. Neverov, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin. Magnetotransport in two-dimensional  $n - \text{InGaAs}/\text{GaAs}$  double-quantum-well structures near the transition from the insulator to the quantum Hall effect regime. // Low Temperature Physics. 2009. T.35. C.32.

- [A2] Yu.G. Arapov, V.N. Neverov, G.I. Harus, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, S.V. Gudina, **I.V. Karskanov**, O.A. Kuznetsov, A. de Visser, L. Ponomarenko. Transport properties of two-dimensional hole gas in a  $Ge_{1-x}Si_x/Ge/Ge_{1-x}Si_x$  quantum well in a vicinity of metal-insulator transition. // Физика и техника полупроводников. 2007. Т.41. Выпуск 11. С.1333-1340.
- [A3] Yu.G. Arapov, G.I. Harus, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, N.G. Shelushinina, M.V. Yakunin, O.A. Kuznetsov, L. Ponomarenko, A. de Visser. Quantum Hall effect in  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  heterostructures with low hole mobility. // Low Temperature Physics. 2007. Т.33. С.147.
- [A4] Y.G. Arapov, M.V. Yakunin, S.V. Gudina, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, G.I. Harus, N.G. Shelushinina, S.M. Podgornyykh, V.N. Zvonkov, E.A. Uskova. Features of quantum effects in two-dimensional  $GaAs/n - InGaAs/GaAs$  structures with double quantum wells. // Low Temperature Physics. 2007. Т.33. С.156.
- [A5] Y.G. Arapov, S.V. Gudina, **I.V. Karskanov**, V.N. Neverov, G.I. Harus, N.G. Shelushinina. Contributions of the electron-electron interaction and weak localization to the conductance of  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  heterostructures. // Low Temperature Physics. 2007. Т.33. С.160.

Публикации в других изданиях:

- [A6] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, **I.V. Karskanov**, V. N. Neverov, N. G. Shelushinina, M. V. Yakunin. Quantum Hall plateau-plateau transition in  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  and  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  heterostructures. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.72-73.
- [A7] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, V. N. Neverov, **I.V. Karskanov**, N. G. Shelushinina. Localization and electron-electron interaction effects in

magnetoresistance of p-type  $Ge/Ge_{1-x}Si_x$  heterostructures. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.80-82.

- [A8] Ю.Г. Арапов, Г.И. Харус, В.Н. Неверов, **И.В. Карсканов**, Н.Г. Шелушина, М.В. Якунин. Спектр уровней Ландау в наклонном магнитном поле. // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.91-93.
- [A9] Ю.Г. Арапов, М.В. Якунин, **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов, Н.Г. Шелушина, Г.И. Харус, С.М. Подгорных. Определение туннельной щели в двойных квантовых ямах  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ . // Тезисы докладов 17-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Новоуральск, 18-23 февраля 2008 г., С.94-95.
- [A10] Ю.Г. Арапов, М.В. Якунин, **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов, Н.Г. Шелушина, Г.И. Харус, С.М. Подгорных. Определение туннельной щели в двойных квантовых ямах  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$ . // VIII Российская конференция по физике полупроводников, "Полупроводники 2007". г.Екатеринбург, 30 сентября 2007 - 5 октября 2007. тезисы докладов, С.203.
- [A11] **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов М.В. Якунин, G. Galistu, A. de Visser. Скейлинг в режиме квантового эффекта Холла для двойных квантовых ям  $InGaAs/GaAs$ . // VIII Российская конференция по физике полупроводников, "Полупроводники 2007". г.Екатеринбург, 30 сентября 2007 - 5 октября 2007. тезисы докладов, С.223.
- [A12] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, **I.V. Karskanov**, V. N. Neverov, N. G. Shelushinina, M. V. Yakunin. Quantum Hall plateau-plateau transition in  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  and  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  heterostructures. // 15th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Novosibirsk, Russia, June

25-29, 2007. тезисы докладов, С.305-306.

- [A13] Yu. G. Arapov, G. I. Harus, **I. V. Karskanov**, V. N. Neverov, N. G. Shelushina, M. V. Yakunin, S. M. Podgornyyh. Direct observation of the transition from the diffusive to the ballistic regime in a  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  and  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  quantum wells. // 15th Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology". Novosibirsk, Russia, June 25-29, 2007. тезисы докладов, С.323-324.
- [A14] Ю.Г.Арапов, М.В.Якунин, С.В.Гудина, **И.В. Карсканов**, В.Н.Неверов, Г.И.Харус, Н.Г.Шелушинина, С.М.Подгорных, Б.Н.Звонков. Влияние заселенности антисимметричных состояний в двойной квантовой яме на квантовые поправки к продольной и холловской проводимости  $GaAs/InGaAs/GaAs$  наноструктур. // Труды 34-го Сопещения по физике низких температур (НТ-34), Ростов-на-Дону, п. Лоо, 26-30 сентября 2006, т.2, С.80-81.
- [A15] Y.G. Arapov, G.I. Harus, **I. V. Karskanov**, V.N. Neverov, N.G. Shelushina, M.V. Yakunin, O.A. Kuznetsov, L.Ponomarenko, A.Visser, Quantum Hall effect in  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$  heterostructures with low hole mobility. // Тезисы докладов 16-й Уральской международной зимней школы по физике полупроводников. Екатеринбург - Кыштым, 27 февраля - 4 марта 2006 г., С.106-107.
- [A16] **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов. Переход плато-плато в режиме квантового эффекта Холла в двойной квантовой яме  $In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs$ // Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 27 ноября - 3 декабря 2006, Тезисы докладов, С.35.
- [A17] Ю.Г. Арапов, М.А. Гинс, **И.В. Карсканов**, В.Н. Неверов, Г.И. Харус, Н.Г. Шелушинина, М.В. Якунин. Переход плато-плато в режиме квантового эффекта Холла в гетероструктурах  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ . // Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния

вещества, Екатеринбург, 27 ноября - 3 декабря 2006, Тезисы докладов, С.20-21.

- [A18] **И.В. Карсканов**, Ю.Г. Арапов, С.В. Гудина, В.Н. Неверов, Шелу-пинина Н.Г., Харус Г.И., Якунин М.В., Разделение вкладов электрон-электронного взаимодействия и слабой локализации в проводимость гетероструктур  $p - Ge/Ge_{1-x}Si_x$ . // Молодежный семинар по проблемам физики конденсированного состояния вещества, Екатеринбург, 28 ноября - 4 декабря 2005, Тезисы докладов, С.31.

## Список литературы

- [1] Altshuler B., Aronov A. Electron-Electron Interaction in Disorder System. Amsterdam, 1985.
- [2] Квантовый эффект Холла / Под ред. Р. Прендж, С. Гирвин. М.: Мир, 1989.
- [3] Houghton A., Senna J., Ying S. Magnetoresistance and hall effect of a disorder interacting two-dimensional electron gas // Phys. Rev. B. 1982. Vol. 25, no. 4. P. 2196.
- [4] Punnoose A., Finkel'stein A. M. Dilute electron gas near the metal-insulator transition: Role of valleys in silicon inversion layers // Phys. Rev. Lett. 2001. Dec. Vol. 88, no. 1. P. 016802.
- [5] Narozhny B. N., Zala G., Aleiner I. L. Interaction corrections at intermediate temperatures: Dephasing time // Phys. Rev. B. 2002. May. Vol. 65, no. 18. P. 180202.
- [6] Якунин М., Подгорных С., Неверов В. Магнитный пробой и квантовый магнитотранспорт с постоянным псевдоспином в наклонных магнитных полях в двойной квантовой яме  $n - In_yGa_{1-y}As/GaAs$  // ЖЭТФ. 2007. Т. 132, № 1. С. 241.

- [7] Huckestein B. Scaling theory of the integer quantum hall effect // Rev. Mod. Phys. 1995. Apr. Vol. 67, no. 2. Pp. 357–396.
- [8] Pruisken A., de Lang D., Ponomarenko L., de Visser A. Universal scaling results for the plateau-insulator transition in the quantum hall regime // Solid State Communications. 2006. Vol. 137, no. 10. Pp. 540 – 544.
- [9] Li W., Csáthy G. A., Tsui D. C. et al. Scaling and universality of integer quantum hall plateau-to-plateau transitions // Physical Review Letters. 2005. Vol. 94, no. 20. P. 206807.
- [10] Cooper N. R., Chalker J. T. Coulomb interactions and the integer quantum hall effect: Screening and transport // Phys. Rev. B. 1993. Aug. Vol. 48, no. 7. Pp. 4530–4544.



